

DLR-IB-FA-BS-2018-130

Kostenabschätzung von hybriden Verstärkungskonzepten für Bolzenverbindungen

Linus von Klinkowström, Enno Petersen



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS- BS-2018-130

Kostenabschätzung von hybriden Verstärkungskonzepten für Bolzenverbindungen


Zugänglichkeit:

Stufe 1 (intern und extern unbeschränkt zugänglich)

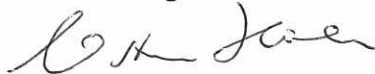
Braunschweig, August, 2018

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

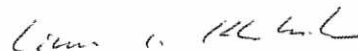

Abteilungsleiter:

Prof. Dr.-Ing. C. Hühne



Der Bericht umfasst: 20 Seiten

Linus von Klinkowström



Enno Petersen





**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Dokumenteigenschaften

Titel	Projekt-Dokumentation
Betreff	Projektname
Institut	Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Erstellt von	Linus von Klinkowström
Beteiligte	Dipl.-Ing. Enno Petersen
Geprüft von	
Freigabe von	
Datum	03.08.2018
Version	1.0
Dateipfad	H:\03-Publikationen+Vorträge+Veranstaltungen\00-IBs\2018\CostTool\IB_Cost-Tool_EP.docx

Inhaltsverzeichnis

Dokumenteigenschaften	2
1. Einleitung.....	4
1.1. Lokale Metallhybridisierung	4
1.2. Cerfac-Cost-Tool.....	5
2. Kostenkalkulation	7
2.1. Funktionsweise des Tools	7
2.2. Annahmen.....	8
2.2.1. Anordnung von Bolzen.....	8
2.2.2. Fertigung von Laminaten	9
2.2.3. Einbringen von Bohrungen	10
2.2.4. Materialkosten und Zuschnitt.....	10
3. Applikationsbeispiel (Ergebnisse).....	12
3.1. Gesamtkosten.....	12
3.2. Parameterstudien	13
4. Diskussion.....	17
5. Schlussfolgerungen	19
Literaturverzeichnis	20
Abbildungsverzeichnis	21
Tabellenverzeichnis	21
Anhang.....	22

1. Einleitung

Der Erfolg einer konstruktiven Lösung steigt und fällt mit seiner Wirtschaftlichkeit. Eine konstruktive Lösung, die zwar die an sie gestellten technischen Anforderungen sehr gut erfüllt, dabei aber mit sehr hohen Kosten verbunden ist, wird sich nicht durchsetzen. Daher müssen bei jeder neuen Entwicklung auch die mit ihr verbundenen Kosten im Auge behalten werden. Eine grobe Abschätzung leistet das hier beschriebene Tool zur Kostenabschätzung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts CERFAC („Cost effective reinforcements for fastener areas in composites“) wurde bereits ein ähnliches Tool entwickelt, das als Motivation für das hier erstellte Tool dient.

1.1. Lokale Metallhybridisierung

Faserverbundbauteile werden in der Luft- und Raumfahrt in der Regel mittels Nieten oder Bolzen miteinander verbunden [1]. Für den Einsatz dieser Verbindungstechniken ist es notwendig, Löcher in die miteinander zu verbindenden Faserverbundbauteile einzubringen. Problematisch daran ist die geringe Lochleibungsfestigkeit des monolithischen CFKs [2]. Entsprechend verringert sich die Last, die durch miteinander gekoppelte monolithische CFK-Bauteile maximal übertragbar ist.

Es existieren verschiedene Techniken, die geringe Lochleibungsfestigkeit von CFK zu kompensieren und somit die im Kopplungsbereich übertragbare Last zu erhöhen. Eine dieser Techniken stellt die lokale Aufdickung der Struktur dar. Durch Hinzufügen zusätzlicher Lagen im Kopplungsbereich wird dieser verstärkt. Um einen gleichmäßigen Übergang zu dem Bereich außerhalb des Kopplungsbereichs zu gewährleisten, wird die lokal verdickte Struktur durch eine sanft abfallende Rampe („Ramp-up“) in die umgebende Struktur überführt. Nachteilig an diesem Verstärkungskonzept sind durch die lokale Aufdickung entstehende Exzentrizitäten, die zu sekundären Biegemomenten und zusätzlichem Gewicht führen [3].

Ein anderes Verstärkungskonzept ist das der lokalen Metallhybridisierung (vgl. Abb. 1). Dabei wird die im Vergleich zu monolithischem CFK erhöhte Lochleibungsfestigkeit von Metallen wie Titanlegierungen oder Stahl genutzt, indem innerhalb des Kopplungsbereichs einzelne CFK-Lagen durch Metalllagen gleicher Dicke ersetzt werden. Bevorzugt werden die Schichten ersetzt, die den geringsten Anteil an der Lastaufnahme im Kopplungsbereich haben. So erhält man ein Laminat, das lokal im Kopplungsbereich verbesserte Lochleibungsfestigkeiten aufweist. Vorteilhaft an dieser Technik ist, dass eine erhöhte Lochleibungsfestigkeit bei gleich bleibender Dicke des Laminats erreicht wird. Die mit dem Ramp-up-Konzept verbundenen Exzentrizitäten werden also vermieden [1].

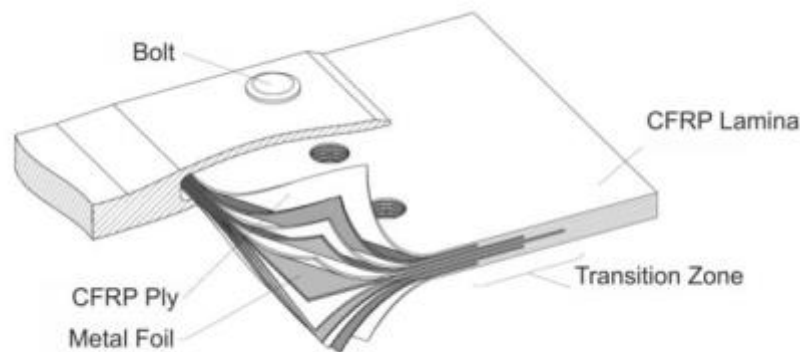


Abbildung 1: Lokale Metallhybridisierung an Fugestellen

Das Konzept der lokalen Metallhybridisierung erlaubt sowohl eine Variation des gewählten Metalls bzw. der Legierung als auch des Metallvolumengehalts. Somit existieren viele verschiedene Möglichkeiten, eine Struktur im Kopplungsbereich zu verstärken und es liegt nahe, die verschiedenen Verstärkungslösungen hinsichtlich übertragbarer Last, Gewicht und Kosten miteinander zu vergleichen.

1.2. Cerfac-Cost-Tool

CERFAC ist ein Forschungsprojekt, das sich unter anderem zum Ziel gesetzt hat, für einen speziellen Anwendungsfall unterschiedliche Strukturverstärkungslösungen an Fugestellen miteinander zu vergleichen. Bei der Optimierung sollen sowohl Beanspruchbarkeit der Struktur, als auch Gewicht und Kosten berücksichtigt werden. In diesem Kontext wurde ein Cerfac-Cost-Tool entwickelt.

Zur Erstellung dieses Cost-Tools müssen die für eine gewisse Verstärkungslösung nötigen einzelnen Arbeitsschritte und Materialien identifiziert werden. Jedem Arbeitsschritt bzw. jedem Material können aufbauend gewisse Kosten zugeordnet werden (z. B. Kosten pro Stunde bzw. pro Quadratmeter). Durch eine Summation über alle nötigen Arbeitsschritte und Materialkosten werden die Gesamtkosten für eine Verstärkungslösung berechnet.

Ziel der Aufschlüsselung der Gesamtkosten in Teilkosten für die einzelnen Produktionsschritte, ist die Identifikation von Kostentreibern. Konnten diese identifiziert werden, so können die Gesamtkosten für eine Verstärkungslösung am effektivsten gesenkt werden.

Als eine Anwendung des Cost-Tools dient eine konstruktive Lösung für die Anbindung eines Winglets an den Flügel, bestehend aus Holmen, Schubplatten, Panels und Verstärkung über eine Buttstrap-Anbindung. Betrachtet werden für jede dieser Komponenten eine Referenzlösung bei der die Ramp-up-Technik verwendet wird und vier hybride Alternativlösungen. Die Hybridlösungen unterteilen sich in eine Stahl- und eine Titan-Hybridisierung mit jeweils 25% und 37,5% Metallvolumengehalt.

Für jede Komponente werden, differenziert nach der jeweiligen Verstärkungslösung, die Gesamtkosten bestehend aus Herstellungskosten und Materialkosten berechnet. Ebenso wird die Masse der jeweiligen Verstärkungslösung berechnet. Kosten und Masse der Alternativlösungen werden auf Kosten

und Masse der Referenzlösung bezogen, um die verschiedenen Lösungen miteinander vergleichen zu können.

Außerdem werden für alle Verstärkungslösungen die Gesamtkosten der Anbindungsstruktur berechnet.

2. Kostenkalkulation

Die Kostenkalkulation des hier beschriebenen Tools ermöglicht eine eher grobe Abschätzung der zu erwartenden Kosten. Sie beruht auf verschiedenen Annahmen, die in diesem Abschnitt beschrieben werden. Ziel des Cost Tools ist es nicht die Kosten exakt zu berechnen, sondern vielmehr auf die Kosten der einzelnen Verstärkungslösungen bezogene Tendenzen aufzuzeigen.

2.1. Funktionsweise des Tools

Ausgehend von dem CERFAC-Cost-Tool wurde eine Überarbeitung durchgeführt, d. h. das Tool teilweise vereinfacht und an anderen Stellen erweitert und verfeinert.

Eine Vereinfachung besteht darin, dass im Gegensatz zum CERFAC-Cost-Tool nun nur noch eine generische Buttstrap-Anbindung betrachtet wird.

Erweitert wurde das Tool unter anderem dahingehend, dass zusätzlich zu der lokalen Metallhybridisierung mit Stahl noch die Substitutio mit Titan hinzugefügt wird.

Zur Erläuterung der Funktionsweise des Tools wird zunächst die Referenzlösung betrachtet. Deren äußere Abmaße werden aus dem CERFAC Cost-Tool übernommen, d. h. für die Referenzlösung hat die Buttstrap-Anbindung eine Länge von 1017,4 mm, eine Breite von 403,2 mm und eine Höhe von 10 mm. Die Referenzlösung beinhaltet 6 Bolzenreihen zur Kopplung à 15 Bolzen, also insgesamt 90 Bolzen.

Über die Höhe der Referenzlösung, den Durchmesser der Bolzen (11 mm), die Lochleibungsfestigkeit des Referenzlaminats und die Gesamtanzahl an Bolzen wird die ertragbare Last im Kopplungsbereich berechnet. Diese maximal übertragbare Last ist die Grundlage des Vergleichs der verschiedenen Verstärkungslösungen, d. h. die hybriden Verstärkungslösungen müssen mindestens ebenfalls diese Last übertragen können.

Basierend auf der maximal übertragbaren Last der Referenzlösung berechnet das Tool über die Lochleibungsfestigkeiten der CFK/St-Lamine und CFK/Ti-Lamine (jeweils 25 % und 37,5% Metallvolumengehalt) die nötige Mindestanzahl an Bolzen für die jeweilige Hybridlösung. Damit die Hybridlösungen mindestens die gleiche Last übertragen können wie die Referenzlösung, muss deren jeweilige Gesamtanzahl an Bolzen also größer gleich der durch das Tool berechneten Mindestanzahl an Bolzen sein. Zu erfüllen ist nur die Bedingung, dass die tatsächliche Anzahl an Bolzen größer gleich der Mindestanzahl ist.

Über die Anzahl an Bolzenreihen wird die benötigte Breite der Buttstrap-Anbindung berechnet. Sie ergibt sich als Produkt des Bolzenabstandes und der Anzahl an Bolzenreihen. Anders als die Breite der Buttstrap-Anbindung wird deren Länge festgehalten. Die Länge ist somit für jede Lösung identisch. Über die Länge und Anzahl an Bolzen pro Reihe ergibt sich der Bolzenabstand für die jeweilige Verstärkungslösung, der dann wiederum in die Berechnung der Breite einfließt.

Nachdem Länge und Breite der Buttstrap-Anbindung für die jeweilige Verstärkungslösung bestimmt sind, berechnet das Tool die jeweilige Fläche, die zur späteren Kostenkalkulation benötigt wird. Wie erwähnt beträgt die Höhe der Referenzlösung 10 mm. Sie beinhaltet ein „Basislaminat“ von 6 mm Höhe sowie das lokal verstärkende Ramp-up von 4 mm Höhe. Über die fixe Dicke der CFK-Lagen von 0,131 mm berechnet das Tool dann die Anzahl an Lagen für Basislaminat (46) und Ramp-up (31).

Für die Hybridlösungen entfällt das Ramp-up, sie haben alle eine Höhe von 6 mm, dementsprechend 46 Lagen. Über den jeweiligen Metallvolumengehalt der Hybridlösungen und die Gesamtanzahl an Lagen berechnet das Tool die jeweilige Anzahl an Metalllagen.

Somit ist also für jede Verstärkungslösung die Fläche der einzelnen Lagen sowie deren jeweilige Gesamtanzahl bestimmt. Deren Produkt ergibt die jeweils insgesamt benötigte Materialmenge in Quadratmetern, die zur Kostenkalkulation benötigt wird.

Die gesamte Fertigung der jeweiligen Verstärkungslösungen wird durch das Tool in die jeweils nötigen Arbeitsschritte unterteilt, für die die Kosten auf Grundlage von Maschinenkosten, Arbeitszeit und Materialkosten berechnet werden. Die Gesamtkosten ergeben sich als Summation über die Kosten der einzelnen Arbeitsschritte. Sie werden für jede Verstärkungslösung berechnet und für die Hybridlösungen prozentual auf die Gesamtkosten der Referenzlösung bezogen. Ebenfalls berechnet wird das Gewicht der jeweiligen Verstärkungslösung.

2.2. Annahmen

Der Kostenkalkulation zugrunde liegen Annahmen bezüglich der Kosten pro Stunde von beispielsweise zur Herstellung benötigter Maschinen, Annahmen bezüglich der Materialkosten pro Quadratmeter und angenommene Zeitdauern der verschiedenen Bearbeitungsschritte. Diese sowie weitere Annahmen, die der Kostenkalkulation zugrunde liegen, werden im Folgenden erläutert.

2.2.1. Anordnung von Bolzen

Im ursprünglichen Cerfac-Cost-Tool findet sich die Annahme, dass die Anzahl der Bolzenreihen der Buttstrap-Anbindung eine gerade Zahl sein muss. Dies ist der Anbindung an zwei Panels geschuldet. Problematisch an dieser Annahme ist, dass die tatsächliche Anzahl an Bolzen deutlich über der benötigten Mindestanzahl liegen kann, da die Anzahl an Bolzen pro Reihe nicht geändert werden kann und immer nur zwei Bolzenreihen hinzu addiert werden können. Liegt also beispielsweise die tatsächliche Bolzenzahl bei vier Reihen nur knapp unter der benötigten Mindestanzahl an Bolzen, so müssen sechs Bolzenreihen verwendet werden, womit die Bolzenzahl deutlich über der Mindestanzahl liegt. Dadurch ist die Beanspruchbarkeit der Alternativlösungen im ursprünglichen Cerfac-Cost-Tool teilweise beträchtlich höher als diejenige der Referenzlösung, womit keine gute Vergleichsbasis geschaffen ist.

Da nun im modifizierten Cost Tool die Buttstrap-Anbindung für sich, also ohne Anbindung an weitere Strukturteile betrachtet wird, wird diese Annahme fallen gelassen. Entsprechend hat die Verstärkungslösung QI 25% Stahl 5 Bolzenreihen, gleiches gilt für die Verstärkungslösungen QI 25% Titan und QI 37,5% Titan. Dies ermöglicht nun, dass die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Bolzen nur noch knapp

über der Mindestanzahl von Bolzen für die jeweilige Verstärkungslösung liegt. Diese sind also nicht mehr wie in der ursprünglichen Version des Cost-Tools deutlich überdimensioniert. Damit ist eine bessere Basis für den Vergleich der jeweiligen Lösungen geschaffen.

Die für die Berechnung der Mindestanzahl an Bolzen erforderlichen Lochleibungsfestigkeiten der jeweiligen Lamine stammen aus am DLR durchgeführten Versuchen bzw. aus [1].

Ebenfalls fallen gelassen wird die im ursprünglichen Tool vorhandene Annahme, dass der Bolzenabstand fix und für jede Lösung, abgesehen von der Referenzlösung, der gleiche ist. Der Bolzenabstand wird nun als variabel angenommen. Auch hat dies den Hintergrund, dass somit die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Bolzen besser an die jeweilige Mindestanzahl an Bolzen anpassbar ist. Wäre der Bolzenabstand und somit auch die Bolzenanzahl pro Reihe fix (alle Lösungen haben die gleiche Länge, Bolzenanzahl ist Länge/Bolzenabstand) und wären für eine Verstärkungslösung beispielsweise insgesamt 84 Bolzen bei einer fixen Anzahl von 20 Bolzen pro Reihe erforderlich, so müssten 5 Reihen a 20 Bolzen, also 100 Bolzen eingesetzt werden. Ist nun hingegen der Bolzenabstand als variabel angenommen, so können 4 Reihen a 21 Bolzen eingesetzt werden, sodass keine Überdimensionierung vorliegt.

Je nach Anzahl an Bolzen pro Reihe liegt der Bolzenabstand nun bei 67,2 cm (Referenz) 48,5 cm (QI 25% Stahl), 46,3 cm (QI 37,5% Stahl), 44,3 cm (QI 25% Titan), und 50,9 cm (QI 37,5% Titan). Mit diesen Bolzenabständen sind die Mindestabstände, wie sie in [1] zu finden sind, eingehalten.

2.2.2. Fertigung von Laminaten

Den Laminieraten (Dauer pro Quadratmeter) für Basislaminat CFK, Ramp-Up und Basislaminat Metallfolie liegt die Annahme einer manuellen Ablage zugrunde. Die Laminierate für Basislaminat CFK ist zu 10 min pro Quadratmeter angenommen, die beiden anderen Laminieraten hingegen zu jeweils 12 min pro Quadratmeter. Diese Werte sind aus der ursprünglichen Version des Cost-Tool übernommen, decken sich aber recht gut mit denen, die bei der DLR-internen Fertigung angefragt wurden.

Die Annahme, dass es länger dauert, einen Quadratmeter des Ramp-Ups zu laminieren als einen Quadratmeter des Basislaminats, ist ohne Zweifel berechtigt, da beim Laminieren des Ramp-Ups darauf geachtet werden muss, dass die Rampensteigung von 1/20 eingehalten wird.

Dass hingegen auch das Laminieren der Metallfolie länger dauert als jenes der CFK-Lagen des Basislaminats, ist diskutabel. Bei den Metallfolien ist im Gegensatz zu den CFK-Lagen keine Orientierung zu beachten, was einen geringen Zeitgewinn ermöglicht. Andererseits ist die Anhaftung der Metalllagen schlechter als diejenige der CFK-Lagen, sodass es bei ersteren beim Laminieren eher zu einem Verrutschen kommen kann, der Fertiger hierauf also zusätzlich achten muss. Dennoch könnte auch die Annahme, dass das Laminieren der Metallfolie länger dauert als das der CFK-Lagen des Basislaminats, fallen gelassen und diese beiden Raten gleich gesetzt werden. Dies nicht zu tun, entspricht einer konservativen Herangehensweise.

2.2.3. Einbringen von Bohrungen

Entgegen dem ursprünglichen Cost-Tool wurde die Anzahl der pro Minute gesetzten Bohrungen nach dem zu bohrenden Material differenziert, da sich die optimalen Vorschübe beim Bohren von CFK, CFK/St und CFK/Ti voneinander unterscheiden. Für das Bohren von reinem CFK finden sich in der Literatur Werte für die Vorschübe im Bereich von 5 mm/s [4, 5]. Für den Vorschub beim Bohren von CFK/Ti werden etwa um den Faktor 3 geringere Werte angegeben [6,7]. Bei DLR-internen Versuchen stellte sich ein Vorschub von 0,33 mm/s als optimal für das Bohren von CFK/St heraus. Da nicht der reine Bohrprozess allein betrachtet wird, sondern auch Nebenzeiten wie Zustellzeiten in Betracht gezogen werden, werden für das Bohren von reinem CFK und CFK/Ti ein Faktor 2, für das Bohren von reinem CFK und CFK/St ein Faktor 7 angesetzt.

Für das Bohren wurden zusätzlich die Werkzeugkosten mit in die Kalkulation einbezogen. Eine Internet-Recherche bei Herstellern von Bohrern ergab, dass mehr oder weniger unabhängig davon, ob reines CFK, CFK/Ti oder CFK/St gebohrt wird, mit Stückpreisen von etwa 300 € zu rechnen ist [8]. Bei den Werkzeugkosten wurde also nicht nach dem zu bohrenden Material differenziert.

Die Kosten der Bohrungsinspektion werden für die hybriden Verstärkungslösungen als höher angenommen als diejenigen der Referenzlösung. Wegen der Metalllagen kann für die hybriden Lösungen nicht wie bei der Referenzlösung der Ultraschallscanner zur Bohrungsinspektion verwendet werden. Dennoch wird im ursprünglichen Cost-Tool dessen Kostenrate herangezogen, wobei allerdings die Inspektionsdauer für die hybriden Varianten verdoppelt wird. Dies berücksichtigt zwar nicht, dass für die hybriden Varianten eigentlich ein anderes Prüfgerät als der Ultraschallscanner verwendet werden müsste, dennoch wird über die verdoppelte Inspektionsdauer mit einbezogen, dass die Inspektionskosten bei den hybriden Verstärkungslösungen höher sind. Dieses Vorgehen zur Berechnung der Inspektionskosten wird übernommen, könnte aber noch verfeinert werden.

2.2.4. Materialkosten und Zuschnitt

Die Materialkosten für das Prepreg wurden einer Rechnung des Herstellers Hexcel entnommen. Auch der Quadratmeterpreis für unbehandelte Stahlfolie wurde einer Lieferungsrechnung entnommen. Aus der ursprünglichen Version des Cost Tools übernommen wurde hingegen der Quadratmeterpreis der vorbehandelten Stahlfolie. Dieser Preis könnte genauer berechnet werden, indem die Kosten für das Sandstrahlen und die Sol-Gel-Behandlung mit ihren jeweiligen Materialkosten und Dauern auf den Preis der unbehandelten Stahlfolie addiert würden.

Für Titanfolie wurden bei den Herstellern EVOCHEM GmbH und Ulbrich Stainless Steels & Special Metals Inc. Angebote eingeholt. Der Quadratmeterpreis beläuft sich auf 408 € (Legierung Ti6Al4V) und 576 € (Legierung Ti-15-3-3-3) und liegt damit sehr viel höher als derjenige von Stahlfolie (8 €). Der Quadratmeterpreis der vorbehandelten Titanfolie wurde abgeschätzt, indem zum Preis der unbehandelten Folie die Differenz von vorbehandelter und unbehandelter Stahlfolie hinzu addiert wurde. Für die Kalkulation verwendet wurde die kostengünstigere Titanlegierung Ti6Al4V.

Die Annahmen bezüglich des Fertigungsausschusses wurden aus dem ursprünglichen Tool unverändert übernommen. Dieser wird für die Referenzlösung zu 15%, für die hybriden Alternativlösungen mit Stahl/Titan hingegen zu 20% angenommen. Grund dafür ist, dass bei der Referenzlösung alle Lagen des Basislaminats die gleichen Abmaße haben, während diese bei den hybriden Alternativlösungen je nach Lage variieren, da im Übergangsbereich CFK-Lagen teilweise durch Metalllagen ersetzt werden. Die Dauern des Autoklavprozesses und des anschließenden Entformens werden unabhängig von der jeweiligen Verstärkungslösung zu 5 h und 1 h angenommen, da es hierbei unerheblich ist, ob es sich um ein monolithisches oder hybrides Bauteil handelt.

Verfeinert wurde die Berechnung der Materialkosten für das Ramp-up, indem die Fläche des Ramp-Ups genauer berechnet wurde als im ursprünglichen Cost-Tool. Für den Zuschnitt des Prepregs wird ein Wert von 1 m² pro Minute angenommen. Dieser Wert wurde intern bei der DLR-Fertigung erfragt. Gleiches gilt für die Zuschneidrate der Metallfolie.

3. Applikationsbeispiel (Ergebnisse)

3.1. Gesamtkosten

Tabelle 1 zeigt die Werte für Kosten und Masse der einzelnen Verstärkungslösungen, die sich mit den oben beschriebenen Annahmen ergeben.

	Referenz (abs./rel.)		QI 25% Stahl (abs./rel.)		QI 37,5% Stahl (abs./rel.)		QI 25% Titan (abs./rel.)		QI 37,5% Titan (abs./rel.)	
Kosten [€/ %]	3911,93	100	3199,61	81,79	2893,12	73,96	4114,61	105,18	5067,97	129,55
Masse [kg/ %]	8,13	100	6,20	76,24	5,82	71,61	4,70	57,75	5,51	67,80

Tabelle 1: Kosten und Masse der Referenz und hybriden Verstärkungslösungen

Die beiden Verstärkungslösungen mit Stahl als Hybridisierungsmaterial ermöglichen eine Kostenreduktion gegenüber der Referenzlösung, die Titan-Verstärkungslösungen hingegen nicht. Zu erkennen ist dies ebenfalls im Säulendiagramm (Abb. 2), das die Gesamtkosten in Herstellungs- und Materialkosten aufgliedert. Das Diagramm zeigt, dass der Kostenzuwachs der Titan-Verstärkungslösungen bezogen auf die Referenzlösung seine Ursache in den hohen Materialkosten hat. Bei der Variante QI 37,5% Titan haben sich diese bezogen auf die Referenzlösung fast verdoppelt.

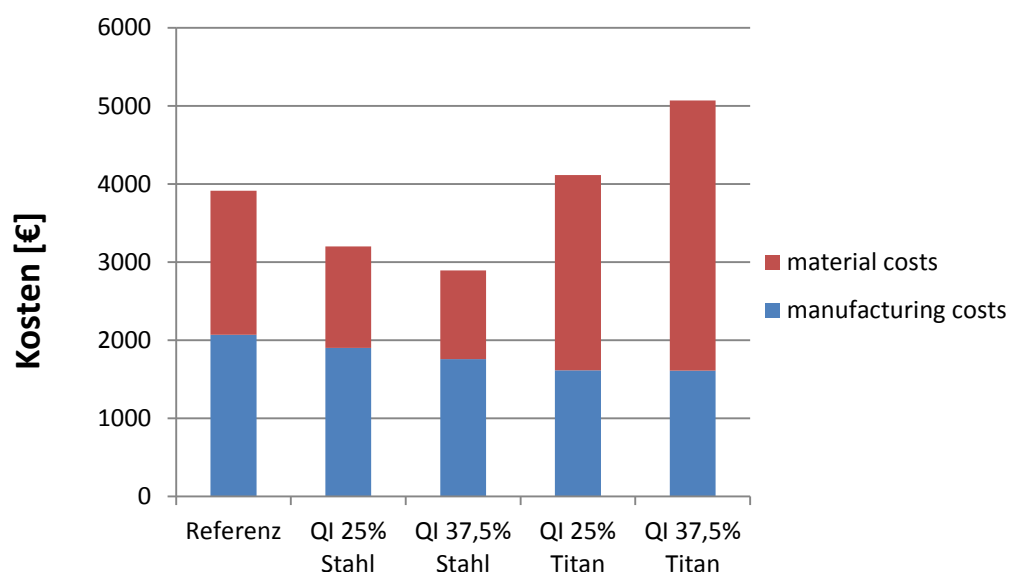


Abbildung 2: Kostenzusammensetzung der Referenz und hybriden Verstärkungslösungen

Betrachtet man die Massen der jeweiligen Verstärkungslösung, so erkennt man, dass alle Hybridlösungen der Referenzlösung diesbezüglich überlegen sind. Die Verstärkungslösungen mit Titan als Hybridisierungsmaterial bieten gegenüber Stahl ein zusätzliches Gewichtsreduktionspotential. Für die Variante QI 25% Titan ist das Gewicht gegenüber der Referenzlösung fast auf die Hälfte reduziert, für die Variante QI 37,5 % Titan liegt die Gewichtsreduktion immerhin noch bei knapp 30%.

3.2. Parameterstudien

Eine Variation eines Kostenfaktors wie beispielsweise des Prepreg-Materialpreises wirkt sich unterschiedlich auf die Gesamtkosten der einzelnen Verstärkungslösungen aus, d. h. die einzelnen Verstärkungslösungen reagieren unterschiedlich sensitiv auf die Variation eines Kostenfaktors.

Zur Ermittlung dieser verschiedenen Sensitivitäten wird eine Parameterstudie durchgeführt. Diese kann aufzeigen, welche Kostenfaktoren das größte Potential zur Einsparung von Kosten aufweisen.

Variiert werden der Materialpreis des Prepregs, die Bohrungsdauer, die Betriebskosten der CNC-Maschine und die Kostenrate des Fertigers. Die Variation liegt jeweils im Bereich von -20 % bis +20 %.

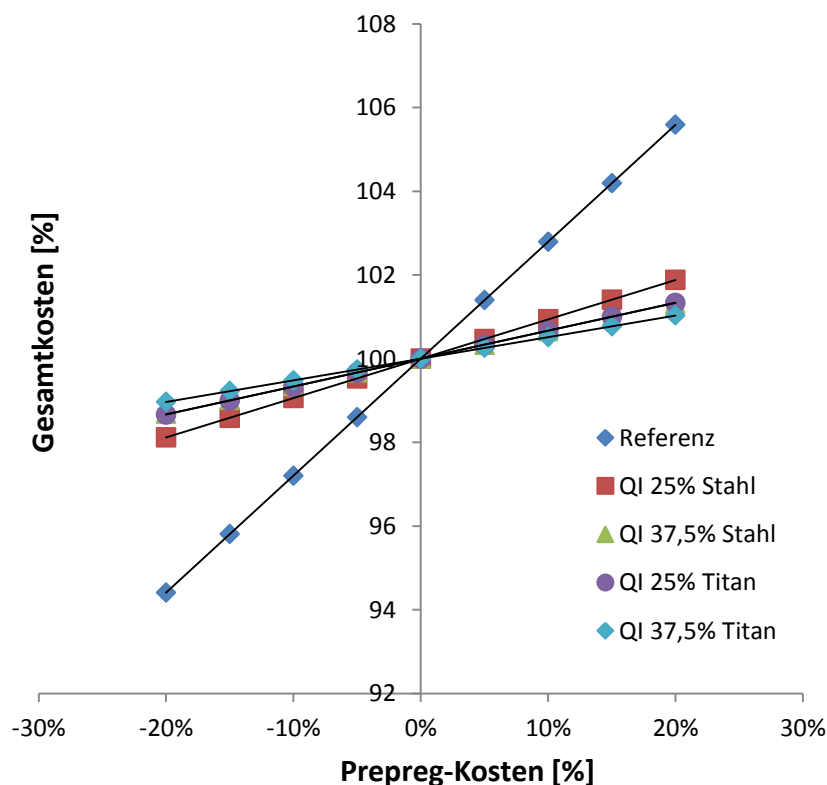


Abbildung 3: Sensitivität Prepreg-Kosten

Abbildung 3 zeigt die prozentuale Veränderung der Gesamtkosten der einzelnen Verstärkungslösungen bei einer Variation des Prepreg Preises. Wie anhand der Geradensteigung zu erkennen, reagiert die

Referenzlösung am sensitivsten auf eine Veränderung des Prepreg-Preises, d. h. eine Reduktion oder Erhöhung dieses Preises würde sich auf die Gesamtkosten der Referenzlösung am stärksten auswirken. Am wenigsten bemerkbar macht sich eine Variation des Prepreg Preises bei den Gesamtkosten der Stahl-/Titan-Verstärkungslösungen mit jeweils 37,5% Metallvolumengehalt.

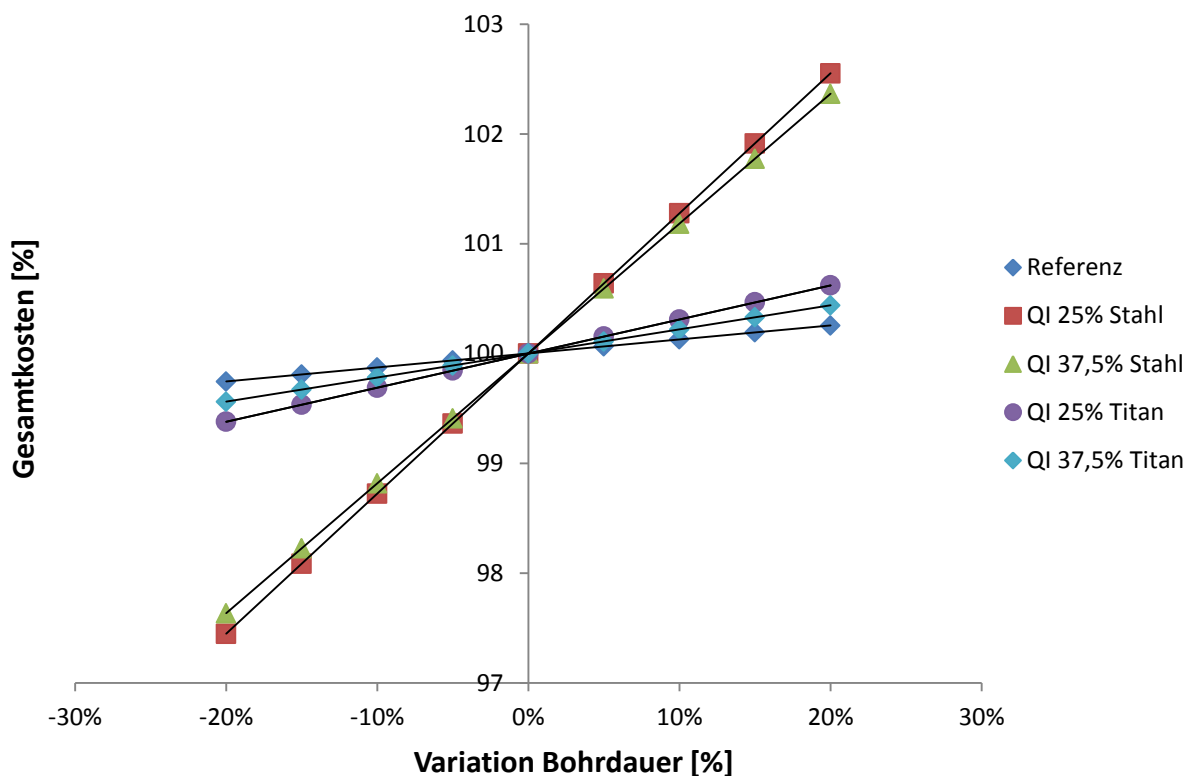


Abbildung 4: Sensitivität Bohrdauer

Variiert man die Bohrdauer, so zeigt sich der größte Einfluss auf die Gesamtkosten bei den Stahl-Verstärkungslösungen (vgl. Abb. 4). Am wenigsten sensitiv zeigt sich hier die Referenzlösung. Verglichen mit den Auswirkungen einer Variation des Prepreg-Preises sind diejenigen einer Variation der Bohrdauer deutlich geringer, sieht man von der Ausnahme der Hybridisierungsvariante mit Stahl ab., bei der die Bearbeitungsdauer entsprechend Abschnitt 2.2.1 höher angesetzt wurde.

Die Sensitivitäten der einzelnen Verstärkungslösungen auf eine Variation der Kostenrate der CNC-Maschine sind mit Ausnahme der Referenzlösung die gleichen wie diejenigen bei einer Variation der Bohrdauer (vgl. Abb. 5).

Bei einer Variation der Kostenrate des Fertigers ist wiederum der Einfluss auf die Gesamtkosten der Referenzlösung am größten (vgl. Abb. 6). Am wenigsten sensitiv zeigen sich hier die beiden Hybridisie-

rungsvarianten mit Titan. Allgemein lässt sich aussagen, dass die Sensitivität aller Verstärkungslösungen bei einer Variation der Kostenrate des Fertigers am stärksten ausgeprägt ist.

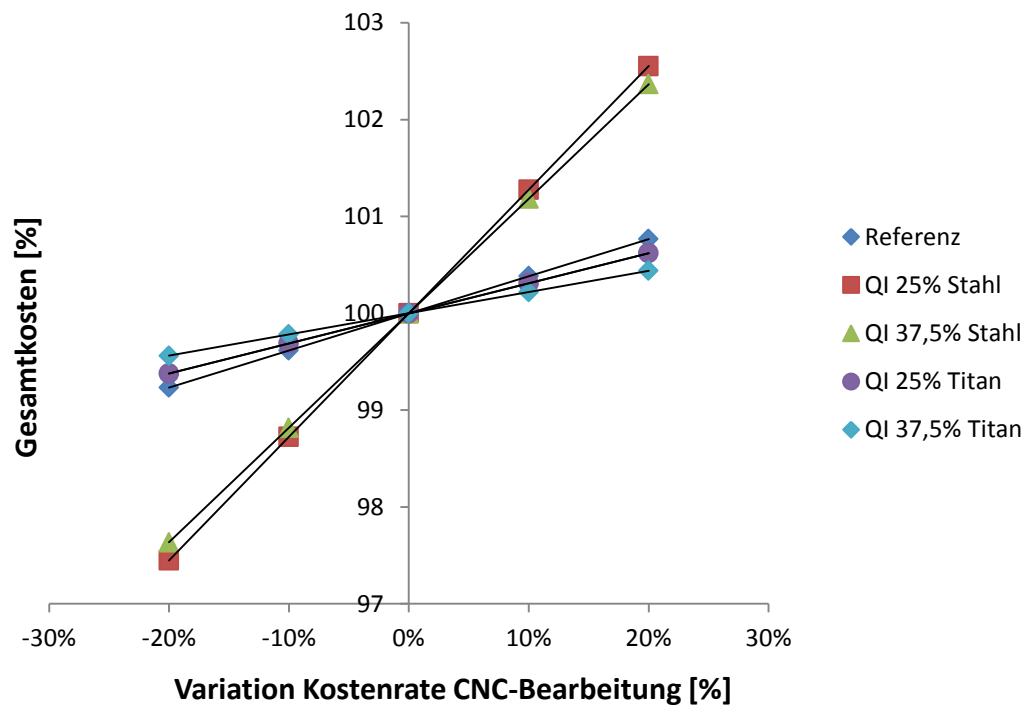


Abbildung 5: Sensitivität Kostenrate CNC-Bearbeitung

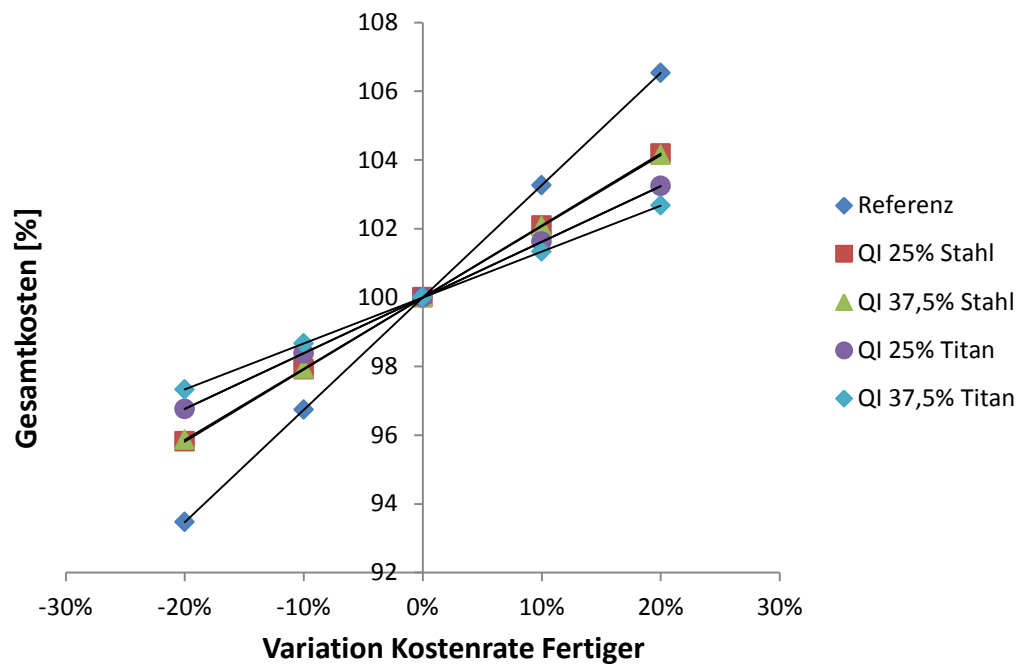


Abbildung 6: Sensitivität Kostenrate Fertiger

4. Diskussion

Im Folgenden werden die im vorangegangenen Abschnitt präsentierten Ergebnisse diskutiert. Zunächst erfolgt die Diskussion der in Tab. 1 dargestellten Ergebnisse und im Anschluss daran die der Ergebnisse der Parameterstudie.

Bezogen auf die Masse sind alle hybriden Varianten der Referenzlösung deutlich überlegen. Dies liegt daran, dass bei den hybriden Varianten das Ramp-up entfällt, das mit einer Masse von knapp 3 kg einen beträchtlichen Anteil an der Gesamtmasse einnimmt. Natürlich ist das Basislaminat bei jeder der hybriden Verstärkungslösungen schwerer als das Basislaminat der Referenzlösung, da bei den hybriden Varianten CFK-Lagen durch Metalllagen höherer Dichte ersetzt werden. Die daraus resultierende Gewichtszunahme ist im Vergleich zum Ramp-up aber gering (bspw. nur ca. 0,8 kg mehr Basislaminatmasse bei QI 25% Stahl als bei der Referenzlösung).

Wie zu erwarten bringen die Titan-Varianten die im Vergleich zu Stahl größere Massenreduktion gegenüber der Referenzlösung mit sich. Die Dichte der gewählten Titan-Legierung ist mit $4,4 \text{ g/cm}^3$ fast halb so groß wie diejenige der gewählten Stahllegierung ($8,2 \text{ g/cm}^3$).

Dem gegenüber stehen die durch den außerordentlich hohen Preis der Titanfolie verursachten großen Gesamtkosten der Titanvarianten. Würde allein das Gewicht in Betracht gezogen werden, hätten also die Kosten keinen Einfluss auf die Entscheidung, welche Verstärkungsvariante zu bevorzugen sei, so wären die hybriden Lösungen mit Titan zu bevorzugen. Ein solches Szenario ist für die meisten Anwendungen jedoch nicht realistisch. Ausschlaggebend ist, ob das verringerte Gewicht der Titanvarianten deren erhöhte Materialkosten dahingehend kompensieren kann, dass über die Lebensdauer entsprechend Treibstoffkosten eingespart werden können. Dies kann bspw. bei Raumfahrtanwendungen der Fall sein. Dann wäre den Titanvarianten der Vorzug zu geben.

Die Ursache dafür, dass die Referenzlösung am sensitivsten auf eine Variation des Prepreg-Preises reagiert, liegt darin, dass die Referenzlösung allein aus CFK besteht. Schon im Basislaminat der Referenzlösung sind mehr Lagen CFK (46) verarbeitet als bei den Hybridisierungsvarianten (35 bzw. 29). Dazu kommt noch das aus reinem CFK bestehende Ramp-up, das bei den hybriden Varianten entfällt. Außerdem ist die Fläche der für die Referenzlösung benötigten Prepreg-Lagen mit $0,41 \text{ m}^2$ teils erheblich größer als diejenige der Prepreg-Lagen der hybriden Verstärkungslösungen. Diese drei Faktoren begründen zusammen die erhöhte Sensitivität der Referenzlösung auf eine Variation des Prepreg-Preises.

Dass die beiden Hybridisierungsvarianten mit 37,5%-Metallvolumenanteil die geringste Sensitivität auf eine Variation des Prepreg-Preises zeigen, liegt darin begründet, dass bei diesen Varianten am wenigsten Lagen Prepreg verwendet werden. Der Anteil der Materialkosten des Prepregs an den Gesamtkosten ist bei diesen Varianten also am geringsten, demzufolge wirkt sich eine Veränderung der Prepregkosten auch nur geringfügig aus.

Die etwas höhere Sensitivität der Variante QI 25% Stahl im Vergleich zu der Variante QI 25% Titan hat ihre Ursache in der etwas größeren Fläche der Prepreg-Lagen ersterer.

Dass die beiden Hybridisierungsvarianten mit Stahl vergleichsweise sensitiv auf eine Veränderung der Bohrzeit reagieren, liegt daran, dass durch die Annahme des relativ geringen Vorschubs beim Stahlbohren und infolgedessen der verlängerten Bearbeitungszeit die Bohrkosten bei den Stahl-Varianten einen deutlich größeren Anteil an den Gesamtkosten haben als bei den drei anderen Verstärkungslösungen. Bei der Variante QI 25% Stahl sind 105 Löcher zu bohren, bei der Variante QI 37,5% Stahl hingegen nur 88, sodass erstere Variante noch etwas stärker auf eine Variation der Bohrdauer reagiert als letztere.

Dadurch, dass beim Bohren von reinem CFK der größte Vorschub angenommen wird, die Bohrkosten hier folglich einen sehr geringen Anteil an den Gesamtkosten haben, ist der Einfluss einer Veränderung der Bohrzeit auf die Gesamtkosten der Referenzlösung am geringsten.

Abgesehen von der Referenzlösung reagieren alle Verstärkungslösungen auf eine Veränderung der Kostenrate der CNC-Maschine ebenso sensitiv wie auf eine Veränderung der Bohrzeit. Dies hat den simplen Hintergrund, dass das Bohren an der CNC-Maschine erfolgt und diese bei den hybriden Varianten sonst nicht weiter zum Einsatz kommt, da die Besäumung durch Wasserstrahlschneiden erfolgt. Die Referenzlösung hingegen wird an der CNC-Maschine besäumt, infolgedessen reagiert die Referenzlösung etwas sensitiver auf eine Variation der Kostenrate der CNC-Maschine als auf eine Variation der Bohrzeit.

Auch bei einer Variation der Kostenrate des Fertigers zeigt die Referenzlösung die größte Sensitivität. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine manuelle Ablage der Prepreg- bzw. Stahllagen angenommen wird, hier also der Fertiger zum Einsatz kommt, und bei der Referenzlösung einerseits die größten Flächen, andererseits aber auch durch das Ramp-up am meisten Lagen zu laminieren sind. Aufgrund der großen Materialkosten der Titanfolie, die den Einfluss der Herstellungskosten auf die Gesamtkosten eher gering halten, zeigen die Hybridisierungsvarianten mit Titan hier wiederum die geringste Sensitivität.

5. Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden Schlussfolgerungen genannt, die sich aus der Diskussion des vorangegangenen Abschnitts ziehen lassen.

Wie bereits erwähnt, liefert das Cost-Tool einen Hinweis darauf, dass die Technik der lokalen Metallhybridisierung der Ramp-up-Technik nicht nur hinsichtlich des Gewichts überlegen ist, sondern auch kosteneffizienter sein kann.

Darüber, ob als Hybridisierungsmaterial Stahl oder Titan zu bevorzugen sei, lässt sich allein auf der Grundlage des Cost-Tools keine Aussage treffen. Eine Verstärkungslösung mit Titan geht zwar mit erhöhten Kosten einher, diese könnten aber über den Lebenszyklus eines Flugzeugs durch das verringerte Gewicht im Vergleich zu den Verstärkungslösungen mit Stahl kompensiert werden.

Wie Abb. 4 zeigt, reagieren alle hybriden Lösungen sensitiver auf eine Veränderung der Bohrzeit als die Referenzlösung, insbesondere die beiden Verstärkungslösungen mit Stahl. Ist es Intention, die Kosten der hybriden Varianten weiter zu senken, so ist eine Reduktion der Bohrzeiten ein vielversprechender Ansatz. Damit dies nicht auf Kosten der Oberflächenqualität der Bohrung und der Standzeit des Werkzeugs geht, sind Innovationen hinsichtlich der Bohrtechniken und Werkzeuge nötig. Bedenkt man, dass bei Flugzeugen wie dem Airbus A350 bis zu 55000 Löcher zu bohren sind [9], so bietet der Bohrprozess ein großes Kostenreduktionspotential.

Dass alle Verstärkungslösungen am sensitivsten auf eine Variation der Kostenrate des Fertigers reagieren, zeigt, dass auch hierin großes Kostenreduktionspotential liegt. Dieses könnte genutzt werden, indem der hohe Grad an manueller Fertigung reduziert, also sukzessive durch kostengünstigere und schnellere maschinelle Fertigung ersetzt wird. Den größten positiven Einfluss hätte dies auf die Gesamtkosten der Referenzlösung, aber auch die Kosten der hybriden Lösungen könnten dadurch deutlich gesenkt werden.

Auch wenn das Cost-Tool nicht viel mehr sein kann als eine Möglichkeit der relativ groben Kostenabschätzung, so liefert es dennoch einen Hinweis darauf, dass an Kopplungsstellen hybride Verstärkungslösungen einer Verstärkung mit monolithischem CFK inklusive Ramp-up hinsichtlich Kosten, Gewicht und auch Beanspruchbarkeit überlegen sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Fink, A. (2010). Lokale Metallhybridisierung zur Effizienzsteigerung von Hochlastfügestellen in Faserverbundwerkstoffen. *Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig*
- [2] Petersen, E., Stefaniak, D., Hühne, C. (2014). Efficient joint design using metal hybridization in fiber reinforced plastics. *Euro Hybrid Materials and Structures 2014 April 10-11*
- [3] Petersen, E., Stefaniak, D., Hühne, C. (2017). Experimental investigation of load carrying mechanisms and failure phenomena in the transition zone of locally metal reinforced joining areas. *Composite Structures 182, S. 79-90*
- [4] Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A. et al (2016). A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP). *Composite Structures 155, S. 173-183*
- [5] Eneyew, E., Ramulu, M. (2014). Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites. *Journal of Materials Research and Technology 3(4), S. 354-362*
- [6] Xu, J., Mkaddem, A., El Mansori, M. (2016). Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Composite Structures 135, S.316-338*
- [7] Poutord, A., Rossi, F., Poulachon, G. et al. (2013). Local approach of wear in drilling Ti6Al4V/CFRP for stack modelling. *Procedia CIRP 8, S. 316-321*
- [8] <https://shop.karnasch.tools/shop/bohren/cnc-bohrer/cnc-bohrer/29-0260> &
<https://shop.karnasch.tools/shop/bohren/cnc-bohrer/cnc-bohrer/29-0120>; aufgerufen am
01.08.2018, 12:51
- [9] Priarone, P., Robiglio, M., Melentiev, R. et al. (2017). Diamond drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymers: Influence of tool grit size and process parameters on workpiece delamination. *Procedia CIRP 66, S. 181-186*

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lokale Metallhybridisierung an Fügestellen 5

Abbildung 2: Kostenzusammensetzung der Referenz und hybriden Verstärkungslösungen..... 12

Abbildung 3: Sensitivität Prepreg-Kosten 13

Abbildung 4: Sensitivität Bohrdauer 14

Abbildung 5: Sensitivität Kostenrate CNC-Bearbeitung 15

Abbildung 6: Sensitivität Kostenrate Fertiger 16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kosten und Masse der Referenz und hybriden Verstärkungslösungen 12

Anhang

**ULBRICH STAINLESS STEELS & SPECIAL METALS, INC.**

Page 1 of 2

SEND CORRESPONDENCE TO:**153 Washington Avenue
North Haven, CT 06473 USA****PHONE:203-239-4481****FAX:203-239-7479**

Deutsches Zentrum für Luft und
Lilienthalplatz 7
Braunschweig, 38108
Germany

July 20, 2018

Dear Mr. Linus von Klinkowström,

Thank you for the opportunity to quote your material requirements. Ulbrich Stainless Steels & Special Metals, Inc. is pleased to offer the following quotation:

Quote: 00103549 Line: 100

RFQ	Type	Gauge/Width	Tmpr	Finish	Edge
	Metastable Beta Titanium Alloy	** Metric ** 0.13000 (+0.01500/-0.01500) x 300.0000 (+0.12700/-0.12700)	AN	#2	3S-#3 Slit

Coil Type: Pancake**Price Breaks:**

QTY	UOM	USD / KGS
30	KGS	= \$1,085.0000

lead time to be decided

Alloy Surcharge is included in the selling price.

Incoterms / FOB Pt: EXW**Freight Pay Terms:** Collect**Payment Terms:** 000 Prepay

Pricing inclusive of implemented Duties and Surcharge Tariffs on affected products.

Pricing is subject to announced Increases, Changes, and Government Law such as imposed Duties and Tariffs.

If you have additional questions, please do not hesitate to contact me. Thank you for your consideration.

Sincerely,

Beate Birkefeld**ULBRICH STAINLESS STEELS & SPECIAL METALS, INC.****E-mail:** bbirkefeld@ulbrich.com**Phone:** 203-234-3424**Fax:** 203-239-7479

Quoted Lead Times are in effect after receipt of order.

This quotation is valid for 5 business days. All material subject to prior sale.

Purchase order acceptance subject to specification review and approval.

All sales are subject to the terms and condition detailed on the following page.**Pricing and Surcharge is subject to announced Increases, Changes, and Government Law such as imposed Duties and Tariffs.****PLEASE EXAMINE THIS QUOTE CAREFULLY.**

20-Jul-2018 11:28:43AM

Customer CopyWSF-03-02 REV 3
7/20/2018



EVOCHEM GmbH, Heinrich-Krumm-Strasse 20, 63073 Offenbach am Main

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Linus von Klinkowström
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Heinrich-Krumm-Strasse 20
 63073 Offenbach am Main
 Germany

Telefon +49 69 9864604-0
 Telefax +49 69 9864604-15

info@evo-chem.de
 www.evo-chem.de

ISO 9001: 2015 certified

Angebot	AN-17478-11996
Angebotsdatum:	16.07.2018
Ihre Kundennummer	12064

Ihre UStID	DE121965658
Ihre Anfrage	mail 11.07.2018
Versandart	Express
Sachbearbeiter	Michael Heck
Seite	1 von 1

Angebot

Wir bedanken uns für Ihre Anfrage und bieten Ihnen freibleibend nach unseren AGB (www.evo-chem.de) wie folgt an:

Menge	Einh.	ArtNr	Bezeichnung	SC	E-Preis	Gesamt
175	m		Band aus Ti6Al4V 0,13mm x 170mm maximale Einzellängen 13m	01	69,30	12.127,50

Bedingungen: frei Haus
 Verpackung: produktspezifisch
 Lieferfrist: ca. 4 Wochen

Auftragswert					12.127,50 €
SC	USt %	netto	USt	brutto	
01	19,0 %	12.127,50	2.304,23	14.431,73	
SC 36 = 0% Der Leistungsempfänger ist Steuerschuldner nach §13 b UStG Absatz 2					
Nettosumme					12.127,50 €
USt.-Betrag					2.304,23 €
Rechnungsbetrag brutto					14.431,73 €

Zahlungsbedingungen:

Netto innerhalb von 30 Tagen

Gesellschaft mit beschränkter Haftung
 Bankverbindung: Commerzbank AG Frankfurt am Main, Kto.-Nr. 143 188 200 (BLZ 500 800 00) • IBAN: DE18 5008 0000 0143 1882 00
 BIC: DRES DE FF • Eingetragen beim Handelsregister Offenbach, HRB 47149 • USt-IdNr. DE 265 264 157 • Geschäftsführer: Armin Keller